肉用绵羊饲粮营养物质消化率和代谢能预测模型的研究

赵明明[1] 马 涛[1] 马俊南[1] 贾 鹏[1] 赵江波[1] 邓凯东[2] 杨开伦[3] 刁其玉[1*]

（1.中国农业科学院饲料研究所，农业部饲料生物技术重点实验室，北京 100081；2.金陵科技学院动物科学与技术学院，南京 210038；3.新疆农业大学动物科学学院，乌鲁木齐 830052）

摘 要：本试验旨在建立肉用绵羊饲粮营养物质消化率和代谢能（ME）的预测模型。选用66只体重为（45.0±2.0） kg的体况良好的杜泊×小尾寒羊F_1代杂交肉用羯羊，随机分为11个处理，每个处理6个重复，每个重复1只羊。采用随机区组设计，分别测定11种不同粗饲料组成的饲粮的营养物质含量，通过物质代谢试验和气体代谢试验测定这11种饲粮的营养物质消化率和消化能（DE）及ME，在分析饲粮营养物质含量、可消化营养物质、DE和ME的基础上，筛选出最佳估测因子并建立估测方程。结果表明：饲粮干物质（DM）、有机物（OM）、粗蛋白质（CP）、总能（GE）消化率与饲粮中CP、GE和OM含量呈显著或极显著正相关（P<0.05或P<0.01），与中性洗涤纤维（NDF）含量呈显著负相关（P<0.05）；饲粮NDF消化率与饲粮中DM、OM、CP、GE含量达到显著或极显著负相关（P<0.05或P<0.01），与NDF含量达到极显著正相关（P<0.01）。利用饲粮中营养物质含量对ME进行估测的最佳方程为 ME=–49.593+0.594OM–0.107NDF(R^2=0.949，P<0.01)。由此得出，饲粮营养物质消化率、ME与营养物质含量均有较强的相关性，可通过营养物质含量对饲粮的营养物质消化率、ME进行合理估测。

关键词：肉用绵羊；消化率；营养物质；代谢能；预测模型

中图分类号：S826 文献标识码： 文章编号：

饲料营养价值评定一方面需要测定饲料中的营养物质的含量，另一方面还需要评价这些营养物质被动物消化吸收的效率及对动物的营养效果。饲料的能值是影响饲粮成本及饲喂效果的重要因素，受限于能值评定方法的适用性以及投入成本、结果准确性、再现性等因素，很难对所有青粗饲料和农副产品以及精饲料逐一实测[1-2]，因此，建立一种能够简便、准确对饲粮有效能值评定的方法，对于反刍动物饲料资源的合理利用和饲粮的科学配制都有重要意义。目前在评定猪、鸡、鸭等单胃动物对饲料能量的利用效率时通常以测定饲料的消化能和代谢能为主，普遍采用动物试验直接获得实测值，并且通过饲料营养物质含量建立了有效

收稿日期：2016-07-28

基金项目：秸秆饲料生物转化技术研究与示范（20120304202）；国家肉羊产业技术体系（CARS-39）；绵羊甲烷排放的粪便反射特征光谱研究（41475126）

作者简介：赵明明(1990—)，女，河南西平人，硕士研究生，研究方向为动物生理与营养。E-mail: 714496904@qq.com

*通信作者：刁其玉，研究员，博士生导师，E-mail: diaoqiyu@caas.cn

能的估测模型[3-5]。但国内近年来关于反刍动物饲料能量实测方法的研究并不多，相关粗饲料能值估测方程的报道多为计算值或者通过体外法获得的参数所建立[6-7]。饲料有效能值的测定，理论上来说，进行体内消化代谢试验测得的结果才最真实客观。刘洁[8]选用原料组成相同、中性洗涤纤维（NDF）水平涵盖了生产中肉羊可能采食的所有精粗比饲粮，通过动物饲养试验，体内实测了各饲粮的营养物质消化率、有效能值，并建立了通过饲粮营养物质含量对饲粮营养物质消化率、有效能值进行估测的方程，但该试验中试验原料组成单一，对其他原料组成的饲粮可能并不适用。本研究选用肉用绵羊 10 种常用粗饲料原料，通过实测不同粗饲料组成的饲粮的营养物质含量，结合物质代谢试验、气体代谢试验，得到不同营养物质在肉羊体内的消化参数和代谢能（ME）的体内实测值，目的在于探究能否通过饲粮营养物质含量等指标对饲粮营养物质消化率以及有效能值进行客观准确地估测，从而为肉羊饲料资源的合理利用和科学配制提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验动物及试验设计

动物饲养试验和气体代谢试验于中国农业科学院南口中试基地进行，样品分析试验在中国农业科学院饲料研究所家畜营养与饲料研究室进行。试验选用初始体重为（45.0±2.0） kg 的体况良好的杜泊×小尾寒羊 F_1 代杂交肉用羯羊 66 只，随机分为 11 个处理，每个处理 6 个重复，每个重复 1 只羊，单独圈养于不锈钢羊栏（3.2 m×0.8 m×1.0 m）中。

1.2. 试验饲粮及配制

参照 NRC（2007）[9]40～50 kg 成年肉用公羊 1.3 倍维持需要饲喂标准配制基础饲粮（BD），然后再分别由 10 种原料以 20%[10]（此数据经本团队探究所得）的比例替代基础饲粮中的主要原料（玉米+豆粕+羊草）组成 10 种试验饲粮，即羊草饲粮（LC）、苜蓿饲粮（AH）、全株玉米青贮饲粮（WPCS）、玉米秸秆青贮饲粮（CSC）、地瓜秧饲粮（SPV）、花生秧饲粮（PV）、玉米秸秆饲粮（CS）、黄豆秸饲粮（SS）、小麦秸秆饲粮（WS）、稻秸饲粮（RS）。饲粮组成及营养水平见表 1。

表 1　饲粮组成及营养水平（干物质基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of diets (DM basis)　　　%

项目 Items	基础饲粮 BD	全株玉米青贮饲粮 WPCS	苜蓿饲粮 AH	玉米秸秆饲粮 CS	地瓜秧饲粮 SPV	豆秸饲粮 SS	小麦秸秆饲粮 WS	玉米秸青贮饲粮 CSC	稻草秸秆饲粮 RS	花生秧饲粮 PV	羊草饲粮 LC
替代原料 Substituted material		19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50
玉米 Corn	28.54	22.83	22.83	22.83	22.83	22.83	22.83	22.83	22.83	22.83	22.83
豆粕 Soybean meal	18.24	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59
羊草 *Leymus chinensis*	50.68	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
石粉 $CaCO_3$	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
食盐 NaCl	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

预混料 Premix[1)]	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels											
干物质 DM	92.58	90.72	92.13	88.96	89.90	89.04	89.54	90.82	92.53	92.25	92.65
有机物 OM	92.78	91.77	91.80	91.96	91.08	91.21	91.18	90.95	91.27	91.08	92.72
总能 GE	17.75	17.49	17.96	17.64	18.03	17.44	17.40	17.45	17.34	17.27	17.83
粗蛋白质 CP	14.87	12.51	14.69	13.53	14.05	13.13	12.35	12.33	12.56	12.79	12.74
中性洗涤纤维 NDF	45.17	47.77	44.99	50.84	48.93	51.45	48.29	48.39	47.82	48.47	46.82
酸性洗涤纤维 ADF	23.49	26.99	26.45	26.30	25.83	27.02	27.21	25.17	23.75	27.23	29.50
粗脂肪 EE	2.04	1.73	2.36	1.72	1.92	1.38	1.89	2.18	1.68	2.27	2.31

[1)] 预混料为每千克饲粮提供 The premix provided the following per kg of diets：Cu 16.0 mg，Fe 60.0 mg，Mn 40.0 mg，Zn 70.0 mg，I 0.80 mg，Se 0.30 mg，Co 0.30 mg，VA 12 000 IU，VD 5 000 IU，VE 50.0 mg。

[2)] 实测值 Measured values。

1.3 试验方法及操作

试验期 19 d，分为预试期 10 d，正试期 9 d，其中气体代谢试验 3 d，物质代谢试验 6 d。在试验结束时，将收集的每只羊粪混合后置于 65 ℃烘箱中 48 h，回潮 48 h 后称重，用于计算初水分含量，再将粪样粉碎过 40 目网筛制成分析样品，以备分析检测。

1.3.1 物质代谢试验

在预试前通过饲喂基础饲粮确定日增重为 0 时的维持需要采食量，试验羊采用限饲的方法（每种饲粮 1 200 g/d），每天 08：00、18:00 各喂 600 g 饲粮，全天自由饮水。物质代谢试验采用由中国农业科学院饲料研究所设计并制作的代谢笼，含有能将粪便与尿液自动分离的装置，采用全收粪尿法收集粪便与尿液。每天称取并记录每只羊排粪量，按 10%取样，将每只羊 6 d 的粪样混合后置于-20 ℃冰箱保存；用盛有 100 mL10%（体积比）H_2SO_4 的塑料桶收集尿液，稀释至 5 L（防止贮存中有尿酸沉淀产生），对稀释尿液充分混合，用纱布过滤后每天取样 20 mL，将每只羊 6 d 的尿样混合后置于-20 ℃冰箱保存。

1.3.2 气体代谢试验

气体代谢试验采用密闭呼吸箱式循环气体代谢系统（Sable）、LGR 气体分析仪测定甲烷产量，通过红外型甲烷分析仪检测进出密闭呼吸箱的甲烷浓度，以及一定时间内流通呼吸箱的气体体积，从而计算出该时间内动物的甲烷实际排放量、二氧化碳产量、氧气消耗量。此系统连接 6 个密闭呼吸箱，可以同时对 6 只动物的呼吸状态连续不间断地进行测定和记录。试验期间将试验羊分 11 批次移入密闭呼吸箱，每批次测定同一处理的 6 只试验羊，进入此密闭呼吸箱后适应 24 h，测定随后 48 h 的甲烷排放量（包括呼吸道和消化道及体表排出的甲烷），用于计算饲粮 ME。

1.4 测定指标和方法

1.4.1 营养物质消化率

饲粮和粪样中的干物质（DM）、粗蛋白质（CP）、粗脂肪（EE）、中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）、总能（GE）含量测定依据《饲料分析及饲料质量检测技术》[11]。饲粮及原料营养物质消化率计算方法参照 Adeola[13]、刘德稳[14]给出的公式：

饲粮营养物质消化率(%)=[食入的营养物质含量（g）–粪中该营养物质含量(g)]/食入的营养物质含量(g)；

饲粮可消化营养物质含量(%)=[饲料营养物质含量(%)×饲粮营养物质消化率(%)]/100。

1.4.2 能值

取 3 张定量滤纸称重记为 m_1，然后测定能值，多次重复，计算出定量滤纸的平均能值。

另取 3 张滤纸称重记为 m_2，后将 10 mL 尿液分多次滴在这 3 张滤纸上，65 ℃烘干冷却后再次称重记为 m_3，于 Parr 6400 氧弹式量热仪中测定滤纸和尿液总能值。

尿能(UE，MJ)=滤纸和尿液总能值(MJ/g)×m_3(g)–滤纸平均能值(MJ/g)×m_2(g)；

甲烷能(CH_4-E，MJ))=甲烷产量(L)×39.54(kJ/L)/1 000[12]；

消化能（DE）= GE(MJ)–粪能（FE）(MJ)；

ME(MJ)=GE(MJ)–FE(MJ)–UE(MJ)–CH_4-E(MJ)。

1.5 统计分析

试验数据采用 Excel 2003 进行初步处理后，采用 SAS 9.2 统计软件中的 Correlate 过程对饲粮的营养物质含量、营养物质消化率、能值等进行相关分析，用 Regression 过程进行回归分析，建立预测方程。

2 结 果

2.1 不同粗饲料组成的饲粮的营养物质消化率

由表 2 可见，不同粗饲料组成的试验饲粮其 DM、OM、CP、GE 消化率具有显著性差异（P<0.05）。其中，苜蓿饲粮的 DM、OM、CP、GE 消化率显著高于玉米秸秆饲粮、羊草饲粮、豆秸饲粮、小麦秸秆饲粮、稻草饲粮（P<0.05）。而饲粮中粗饲料的改变对 NDF 消化率没有产生显著影响（P>0.05）。

表 2 不同粗饲料组成的饲粮的营养物质消化率

Table 2 Nutrient digestibility of diets with different roughages %

项目 Items	干物质消化率 DMD	有机物消化率 OMD	粗蛋白质消化率 CPD	总能消化率 GED	中性洗涤纤维消化率 NDFD
玉米秸秆饲粮 CS	58.51^{cd}	61.37^{cd}	67.57^{d}	59.52^{bc}	41.03
羊草饲粮 LC	59.46^{bcd}	62.58^{bcd}	68.54^{bcd}	60.10^{bc}	43.27
全株玉米青贮饲粮 WPCS	60.29^{abc}	62.91^{abc}	69.01^{bcd}	62.07^{a}	43.81
玉米秸青贮饲粮 CSC	58.93^{cd}	60.87^{d}	66.89^{d}	60.66^{b}	42.89

苜蓿饲粮 AH	61.48[a]	64.47[a]	71.93[a]	63.29[a]	44.18
地瓜秧饲粮 SPV	60.03[abcd]	63.30[ab]	70.76[ab]	62.48[a]	43.46
豆秸饲粮 SS	59.20[bcd]	62.11[bcd]	66.81[d]	59.07[c]	42.13
花生秧饲粮 PV	61.07[ab]	63.57[ab]	70.12[abc]	60.71[b]	44.20
小麦秸秆饲粮 WS	58.56[cd]	62.13[bcd]	67.71[cd]	59.02[c]	40.56
稻草秸秆饲粮 RS	58.33[d]	61.42[cd]	66.42[d]	58.82[c]	41.43
SEM	0.312 8	0.230 2	0.327 2	0.237 8	0.311 3
P 值 *P*-value	0.002 5	0.001 0	<0.000 1	<0.000 1	0.118 0

同列数据肩标不同字母表示差异显著（$P<0.05$），无字母或相同字母表示差异不显著（$P>0.05$）。表 5 同。

In the same column, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), while with no or the same letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$). The same as Table 5.

2.2 饲粮营养物质消化率与营养物质含量的相关性

不同粗饲料组成的饲粮的 DM、OM、CP、GE 和 NDF 消化率分别与饲粮中 DM、OM、CP、GE 和 NDF 含量进行相关性分析，饲粮中各营养物质消化率与饲粮中各营养物质含量的相关系数见表 3。

表 3 饲粮营养物质消化率与营养物质含量的相关系数(*r*)

Table 3 Correlation coefficient (*r*) between nutrient digestibility and nutrient contents of diets

项目 Items	干物质 DM	有机物 OM	粗蛋白质 CP	总能 GE	中性洗涤纤维 NDF
干物质消化率 DMD	0.510	0.724*	0.857**	0.782**	-0.731*
有机物消化率 OMD	0.462	0.738**	0.871**	0.788**	-0.732*
粗蛋白质消化率 CPD	0.419	0.816**	0.934**	0.894**	-0.825**
总能消化率 GED	0.348	0.879**	0.907**	0.848**	-0.826**
中性洗涤纤维消化率 NDFD	-0.641*	-0.797**	-0.653*	-0.695*	0.904**

*：*P*<0.05；**：*P*<0.01。表 6、表 8 和表 11 同 The same as Table 6, Table 8 and Table 11。

从表 3 可以看出，饲粮的 DM 消化率与饲粮中 CP、GE、OM 含量呈显著或极显著正相关（*P*<0.05 或 *P*<0.01），与 NDF 含量呈显著负相关（*P*<0.05）；饲粮的 OM 消化率与饲粮中 OM、CP、GE 含量呈极显著正相关（*P*<0.01），与 NDF 含量呈显著负相关（*P*<0.05）；饲粮的 CP、GE 消化率与饲粮中 OM、CP、GE 含量呈极显著正相关（*P*<0.01），与 NDF 含量呈极显著负相关（*P*<0.01）；饲粮的 DM、OM、CP、GE 消化率均与饲粮中 DM 含量无显著相关性（*P*>0.05）；而饲粮的 NDF 消化率与饲粮中 DM、OM、CP、GE 含量达到显著或极显著负相关（*P*<0.05 或 *P*<0.01），与 NDF 含量达到极显著正相关（*P*<0.01）。

为进一步通过饲粮营养物质含量来预测饲粮营养物质消化率，根据相关性分析结果，分别与营养物质消化率进行逐步回归，建立利用饲粮营养物质含量预测饲粮营养物质消化率的方程（表 4）。结果表明，DM、OM、GE、CP 消化率的最佳变量为 CP 含量，而 NDF 消化率的预测方程的最佳单一变量是 NDF 含量。

表 4　利用饲粮营养物质含量预测饲粮营养物质消化率的方程

Table 4　Prediction equation for nutrient digestibility using nutrition contents of diets　%

项目 Items	预测方程 Prediction equation	相关系数 R^2	*P* 值 *P*-value
干物质消化率 DMD	DMD=–17.443+4.373GE	0.612	<0.001
	DMD=43.776+1.220CP	0.735	<0.001
	DMD=40.991+1.176CP+0.190GE	0.735	<0.001
有机物消化率 OMD	OMD=46.102+1.263CP	0.758	<0.001
	OMD=52.426–0.091NDF+1.113CP	0.765	<0.001
蛋白质消化率 CPD	CPD=112.141–0.909NDF	0.680	<0.001
	CPD=40.386+2.171CP	0.872	<0.001
	CPD=59.054–0.270NDF+1.727CP	0.896	<0.001
总能消化率 GED	GED=94.840–0.716NDF	0.682	<0.001

	GED=38.982+1.660CP	0.823	<0.001
	GED=57.027+1.230CP–0.261NDF	0.859	<0.001
中性洗涤纤维消化率	NDFD=–2.649+0.965NDF	0.817	<0.001
NDFD	NDFD=22.155–0.217OM+0.851NDF	0.821	<0.001

预测方程基于 10 种饲粮的营养物质含量的实测值。表 7 同。

Prediction equations were based on the measured values from nutrient contents of 10 diets. The same as Table 7.

2.3 不同饲粮的能量组成

肉用绵羊对不同饲粮的能量代谢情况见表 5。饲料原料的变化对饲粮 DE、ME、FE、ME 与 GE 的百分比比具有显著或极显著影响（*P*<0.05 或 *P*<0.01），对 CH_4-E、UE 无显著影响（*P*>0.05）。

表 5 肉用绵羊对不同饲粮的能量代谢

Table 5 Energy metabolism of meat sheep fed different diets

项目 Items	消化能 DE/(MJ/kg DM)	代谢能 ME/(MJ/kg DM)	粪能 FE/(MJ/kg DM)	甲烷能 CH_4-E/(MJ/kg DM)	尿能 UE/(MJ/kg DM)	代谢能与总能的百分比 ME/GE/%
玉米秸秆饲粮 CS	10.50^{bcd}	8.50^{c}	7.14^{a}	1.46	0.54	48.19^{c}
羊草饲粮 LC	10.71^{abc}	8.61^{abc}	7.11^{a}	1.50	0.60	48.32^{cd}
全株玉米青贮饲粮 WPCS	10.85^{abc}	8.85^{abc}	6.65^{cd}	1.38	0.62	50.57^{ab}
玉米秸青贮饲粮 CSC	10.58^{bcd}	8.63^{abc}	6.86^{abc}	1.37	0.59	49.48^{bcd}
苜蓿饲粮 AH	11.37^{a}	9.20^{a}	6.59^{cd}	1.47	0.69	51.22^{a}
地瓜秧饲粮 SPV	11.27^{ab}	9.11^{ab}	6.76^{bcd}	1.49	0.66	50.53^{ab}
豆秸饲粮 SS	10.30^{bcd}	8.35^{c}	7.14^{a}	1.34	0.61	47.88^{c}

花生秧饲粮 PV	10.68[abcd]	8.62[abc]	6.98[ab]	1.47	0.60	48.81[bcd]
小麦秸秆饲粮 WS	10.27[cd]	8.28[c]	7.13[a]	1.39	0.60	47.59[c]
稻草秸秆饲粮 RS	10.20[d]	8.23[c]	7.14[a]	1.41	0.56	47.46[c]
SEM	0.095 6	0.071 7	0.039 8	0.016 2	0.015 4	0.305 1
P 值 *P*-value	0.046 2	0.013 9	<0.000 1	0.275 7	0.475 0	0.020 2

2.4 饲粮能值与营养物质含量的关系

由表 6 可知，饲粮中 OM、CP、GE 含量与 FE 呈显著或极显著负相关（P<0.05 或 P<0.01），与 UE、CH_4-E、DE、ME 呈显著或极显著正相关（P<0.05 或 P<0.01）；饲粮中 NDF 含量与 FE 呈极显著正相关（P<0.01），与 UE、CH_4-E、DE、ME 呈显著或极显著负相关（P<0.05 或 P<0.01）。

表 6　饲粮能值与营养物质含量的相关系数(*r*)

Table 6　Correlation coefficient (*r*) between energy values and nutrient content of diets

项目 Items	有机物 OM	粗蛋白质 CP	总能 GE	中性洗涤纤维 NDF
粪能 FE	-0.857**	-0.815**	-0.710*	0.756**
尿能 UE	0.821**	0.949**	0.851**	-0.664*
甲烷能 CH_4-E	0.774**	0.707*	0.844**	-0.807**
消化能 DE	0.961**	0.913**	0.944**	-0.821**
代谢能 ME	0.945**	0.918**	0.907**	-0.786**

为进一步通过饲料常规营养成分来预测饲料能量含量，根据相关性分析结果，将饲粮各能值与其营养物质含量进行逐步回归分析，建立利用饲粮营养物质含量预测饲粮能值的方程，结果见表 7。

表 7　利用饲粮营养物质含量预测饲粮能值的方程

Table 7　Prediction equations for energy values using nutrition contents of diets　　MJ/kg DM

项目 Item	预测方程 Prediction equation	相关系数 R^2	*P* 值 *P*-value
粪能	FE=29.127–0.248OM	0.734	<0.001
FE	FE=32.464–0.416OM+0.663GE	0.798	<0.001

	FE = 50.968–0.620OM+0.848GE–0.074NDF	0.839	<0.001
	FE=39.437–0.509OM+0.960GE–0.054NDF–0.099CP	0.855	<0.001
尿能	UE=–0.044+0.050CP	0.833	<0.001
UE	UE=1.158+0.069CP–0.082GE	0.859	<0.001
	CH_4-E=–2.260–0.209GE	0.682	<0.001
甲烷能	CH_4-E=–4.080+0.339GE–0.037CP	0.741	<0.001
CH_4-E	CH_4-E=–2.769+0.296GE–0.043CP–0.010NDF	0.774	<0.001
	CH_4-E=5.646+0.380GE–0.012CP–0.032NDF–0.103OM	0.853	<0.001
	DE=5.254+0.415CP	0.877	<0.001
消化能	DE=–55.327+0.683OM+0.103NDF	0.958	<0.001
DE	DE=–7.238+0.853GE+0.219CP	0.921	<0.001
	DE=–49.667+0.554OM+0.087NDF+0.375GE	0.964	<0.001
代谢能	ME=4.411+0.324CP	0.827	<0.001
ME	ME=–24.030+0.365OM	0.894	<0.001
	ME=–49.593+0.594OM–0.107NDF	0.949	<0.001

2.5 饲粮 DE 和 ME 与可消化营养物质的相关性

将饲粮的可消化营养物质分别与 DE、ME 进行相关性分析，相关系数见表 8。

表 8 饲粮消化能和代谢能与可消化营养物质的相关系数(r)

Table 8 Correlation coefficient (r) between DE or ME and digestible nutrients of diets

项目 Items	可消化有机物 DOM	可消化蛋白质 DCP	可消化中性洗涤纤维 DNDF	消化能 DE
消化能 DE	0.867**	0.945**	-0.672**	1.000
代谢能 ME	0.819**	0.913**	-0.608*	0.992**

由表 8 可知，DE、ME 与可消化 OM、可消化蛋白质均呈极显著正相关关系（$P<0.01$），与可消化 NDF 呈显著或极显著负相关关系（$P<0.05$ 或 $P<0.01$）。根据表 8，将饲粮可消化营养物质与 DE、ME 进行逐步分析，建立利用可消化营养物质估测饲粮 DE、ME 的方程（表 9）。结果表明，采用饲粮可消化营养物质估测 DE、ME 的单一变量均包含可消化 OM、可消化蛋白质，由方程可以看出，方程中出现的预测因子的数量增加，其方程相关系数（R^2）随之有所增加。

表 9　利用饲粮可消化营养物质预测饲粮消化能与代谢能的方程

Table 9　Prediction equations for DE and ME using digestible nutrients of diets　　MJ/kg DM

项目 Items	预测方程 Prediction equation	相关系数 R^2	P 值 P-value
消化能 DE	DE=–0.882+0.020DOM	0.752	<0.001
	DE=6.880+0.042DP	0.893	<0.001
	DE=5.251+0.045DP+0.000 7DNDF	0.905	<0.001
代谢能 ME	ME=–0.127+0.015DOM	0.671	<0.001
	ME=5.694+0.033DP	0.833	<0.001
	ME=3.701+0.036DP+0.008DNDF	0.859	<0.001
	ME=5.939+0.043DCP+0.000 8DNDF–0.005DOM	0.868	<0.001

由于实际生产中 ME 的测定需要实测动物产生的 CH_4-E，大都无法体内实测 ME，因此根据本试验饲粮所有 DE、ME 实测值建立通过 DE 估测 ME 的估测方程，结果见表 10。

表 10　利用饲粮消化能预测代谢能的方程

Table 10　Prediction equation for ME using DE of diets　　MJ/kg DM

项目 Item	预测方程 Prediction equation	相关系数 R^2	P 值 P-value
代谢能 ME	ME=0.132+0.796DE	0.984	<0.001

3　讨　论

3.1 饲粮营养物质消化率与营养物质含量的关系

饲粮为肉羊提供维持、生长、繁殖的一切营养物质，一般由精饲料和粗饲料共同组成。饲粮进入肉羊消化道后，经机械（咀嚼、胃肠蠕动）及化学（消化液、消化酶）的作用一部分被分解、消化吸收，另一部分未被消化的残渣，最后以粪便的形式排出体外。饲粮营养物质消化率是体现羊对饲粮营养物质利用及生理状况的重要指标，大量研究表明饲粮营养物质消化率与营养物质含量之间存在显著的相关关系[15-20]。姜芳[21]从全国五大地区采集了 6 种饲料原料，采用尼龙袋、体外产气法发现饲料 DM 降解率与其 CP 含量、24 h 产气量呈较高的正相关，与粗灰分、NDF 含量呈负相关。邓卫东[22]研究表明，饲料 DM 体外消化率与 NDF 含量呈极显著负相关，与 CP 含量呈显著正相关，可通过回归方程利用饲料营养成分含量来预测粗饲料的 DM 体外消化率。本研究中，选用肉用绵羊常用的 10 种粗饲料，以 20%的比例替代基础饲粮构成新饲粮作为研究对象，饲粮精粗比为 4:6，饲粮 NDF 含量范围为

44.99%～51.45%。通过体内消化代谢试验实测了 11 种饲粮的营养物质消化率，由于试验采用体内实测，因此每个处理 6 只试验动物，理论上，当建立预测模型时，重复数越多，所得预测方程精确性较高。整个试验过程中严格控制试验环境、羊只条件等可控因素，确保了每只试验羊的生理状态稳定一致，个体差异较小，所得试验数据差异也比较小，因此试验所得数据较客观，准确。通过分析发现通过饲粮营养物质含量可以较准确地对饲粮营养物质消化率进行估测，DM、OM、GE、CP 消化率预测方程的最佳变量均为 CP，而 NDF 消化率预测方程的最佳单一变量是 NDF。刘洁[23]对 12 种精粗比（0:100～88:12）饲粮在肉羊体内的消化率进行了研究，其研究使用的饲粮原料组成相同但比例不同，羊草含量范围为 97.81%～11.66%，NDF 含量范围为 17.03%～51.73%，其研究表明饲粮中营养物质消化率与概略养分含量存在相关性。本研究结果与其研究结果中正负相关性规律一致，且本研究中使用的饲粮原料种类更加多样，更有力地证明了应用饲粮营养物质含量预测营养物质消化率的准确性。

3.2　饲粮能值与营养物质含量的关系

动物体内的能量代谢遵循能量守恒定律，根据该定律可以确定动物对饲粮中能量的利用效率以及饲粮有效能值，最终以饲粮提供的能量满足动物的需要。反刍动物在采食饲粮后，饲粮内的蛋白质、碳水化合物和脂肪会在动物机体内发生一系列的消化和代谢作用。饲粮消化率不同导致有效能不同，基于反刍动物采食饲粮的多样性、瘤胃肠道的特殊性、能量测定的复杂性，多数能量评定体系会通过一些容易获得的饲粮常规营养物质含量指标来估测饲粮的能值。用饲粮营养物质含量估测饲粮能值的研究始于 20 世纪 30 年代，后由 Vansoest 提出将 ADF、NDF 含量引入预测方程这一方法之后，很多的研究者对于预测因子也做了更加准确地探索，目前在猪[24]、禽类[3,25-26]等动物上以及体外研究[27-28]方面应用广泛。而饲粮中的营养物质含量对饲粮能值影响较大的因素有 2 个，一个是在饲粮中消化率高的物质，例如蛋白质；另一个是像 NDF 这样消化率低的营养物质，因此大量研究证明饲粮中的纤维含量与饲粮的有效能值呈显著的负相关，表明将其他与所建模型相关性较高的因子引入到方程中时比以 NDF 含量为主要因子建立的模型效果好[8, 29-31]。本研究中饲粮 DE、ME 与饲粮中 OM、CP、GE、NDF 含量均有显著相关，R^2 在 0.786 以上。相比较于单独预测因子的二元、三元方程 R^2 有所提高，说明预测方程的精确性有所提高。综合考虑快速、简便、准确等因素，生产中应选择较易获得的变量对能值进行估测。

3.3　饲粮能值与可消化营养物质的关系

用饲粮中营养物质含量对饲粮能值进行估测固然简单、快捷，但对于含有抗营养因子的这类饲料就有其缺陷性，因为抗营养因子会直接的影响到饲粮的营养物质消化率。这种情况

下，有研究者将饲粮的消化参数作为预测因子，建立饲粮能值的估测方程。目前应用普遍的一些饲养标准体系中如 AFRC（1993）选用的 ME 估测方程预测因子就是可消化 OM 这一指标[33]。本研究中使用的粗饲料种类较多，根据可消化营养物质与饲粮能值相关性的比较结果进行回归分析，得到 ME=–0.127+0.015DOM（DOM 为可消化 OM，后同），R^2 为 0.671；ME=5.694+0.033DP（DP 为可消化蛋白质，后同），R^2 为 0.833。而刘洁[23]研究得出，ME=–0.438+0.014DOM，R^2 为 0.936；ME=6.823+0.027DP，R^2 为 0.870。比较可知，本研究中估测方程 R^2 虽相对较低，但仍可从侧面说明此估测方程具有一定的客观性、正确性。Yan 等[33]在对羊的黑麦草青贮饲料 ME 预测方程的研究中表明饲粮 ME 与 GE、DE、可消化 OM 在 DM 中所占百分比以及 DM、OM、GE、CP、NDF 消化率呈显著的正相关。本研究亦分析了饲粮能值与营养物质消化率的相关性（表 11），与 Yan 等[33]得到的结果一致。由本研究结果可以看出饲粮 DE、ME 与 DM、OM、CP、GE、NDF 消化率均具有显著或极显著相关性。另外，本研究建立了利用 DE 估测 ME 的模型，得到 ME=0.132+0.796DE，与 NRC（2007）中 ME=0.82DE 相比较，虽然 DE 前面的系数有所偏差，但加上常数，其结果与 0.82DE 十分接近。通过与 NRC（2007）的比较，侧面验证了本试验所建立估测方程的客观准确性。

表 11　饲粮能值与营养物质消化率的相关关系（*r*）

Table 11　Correlation coefficient （*r*） between dietary energy concentration and nutrient digestibility

项目 Items	消化能 DE	代谢能 ME
干物质消化率 DMD	0.845**	0.823**
有机物消化率 OMD	0.837**	0.789**
粗蛋白质消化率 CPD	0.935**	0.899**
总能消化率 ED	0.964**	0.976**
中性洗涤纤维消化率 NDFD	0.717**	0.703**

当使用可消化营养物质估测饲粮能值时，与采用饲粮营养物质含量建立估测模型具有相同的规律。多个预测因子组合建立的估测方程其 R^2 通常高于单个预测因子建立的方程。利用可消化营养物质来估测饲粮能值，需要耗费大量的人力、财力，且开展动物消化代谢试验周期较长，不能保证试验结果的可重复性和准确性。因此，尽管可消化营养物质作为预测因子建立饲粮能值的估测模型具有较高的准确性，但从实际出发，饲粮营养物质含量仍是较为理想的预测因子。

4　结　论

饲粮营养物质消化率与营养物质含量有较强的相关性，可通过饲粮 OM、CP、GE、NDF 含量对营养物质消化率进行估测；饲粮 ME 与 DM、OM、CP、GE、NDF 含量，可消化 OM、CP、NDF 含量，DM、OM、CP、GE、NDF 消化率有较强的相关性，可通过营养物质含量、消化参数对饲粮 ME 进行估测。

参考文献：

[1] GOSSELINK J M J,DULPHY J P,PONCET C,et al.A comparison of *in situ* and *in vitro* methods to estimate *in vivo* fermentable organic matter of forages in ruminants[J].NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences,2004,52(1):29–45.

[2] MAGALHÃES K A,FILHO S C V,DETMANN E,et al.Evaluation of indirect methods to estimate the nutritional value of tropical feeds for ruminants[J].Animal Feed Science and Technology,2010,155(1):44–54.

[3] WAN H F,CHEN W,QI Z L,et al.Prediction of true metabolizable energy from chemical composition of wheat milling by-products for ducks[J].Poultry Science,2009,88(1):92–97.

[4] HUANG Q,SHI C X,SU Y B,et al.Prediction of the digestible and metabolizable energy content of wheat milling by-products for growing pigs from chemical composition[J].Animal Feed Science and Technology,2014,196:107–116.

[5] 李婷婷.玉米DDGS营养价值预测模型研究[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2013.

[6] 陶春卫.反刍动物常用粗饲料营养价值评定及其有效能值预测模型的建立[D].硕士学位论文.大庆:黑龙江八一农垦大学,2009.

[7] 何亭漪.不同粗饲料在绵羊瘤胃和体外降解规律的研究及代谢能数学预测模型的建立[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.

[8] 刘洁,刁其玉,赵一广,等.肉用绵羊饲料养分消化率和有效能预测模型的研究[J].畜牧兽医学报,2012,43(8):1230–1238.

[9] NRC.Nutrient requirements of small ruminants:sheep,goats,cervids,and new world camelids[S].Washington,D.C.:National Academy Press,2007.

[10] 赵明明,杨开伦,邓凯东,等.直接法与替代法测定羊草对肉用绵羊代谢能的比较研究[J].动物营养学报,2016,28(2):436–443.

[11] 张丽英.饲料分析及饲料质量检测技术[M].3 版.北京:中国农业大学出版社,2007.

[12] 杨嘉实,冯仰廉.畜禽能量代谢[M].北京:中国农业出版社,2004.

[13] ADEOLA O.Digestion and balance techniques in pigs[M]//LEWIS A J,SOUTHERN L

L.Swine nutrition.2nd ed.Washington,D.C.:CRC Press,2001:903–916.

[14] 刘德稳.生长猪常用七种饲料原料净能预测方程[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2014.

[15] ADESOGAN A T,OWEN E,GIVENS D I.Prediction of the *in vivo* digestibility of whole crop wheat from *in vitro* digestibility,chemical composition,*in situ* rumen degradability,*in vitro* gas production and near infrared reflectance spectroscopy[J].Animal Feed Science and Technology,1998,74(3):259–272.

[16] OWENS F N,SAPIENZA D A,HASSEN A T.Effect of nutrient composition of feeds on digestibility of organic matter by cattle:a review[J].Journal of Animal Science,2010,88(Suppl.13):E151–E169.

[17] NOUSIAINEN J,RINNE M,HELLÄMÄKI M,et al.Prediction of the digestibility of primary growth and regrowth grass silages from chemical composition,pepsin-cellulase solubility and indigestible cell wall content[J].Animal Feed Science and Technology,2003,110(1/2/3/4):61–74.

[18] AMMAR H,LÓPEZ S,GONZÁLEZ J S,et al.Seasonal variations in the chemical composition and in vitro digestibility of some Spanish leguminous shrub species[J].Animal Feed Science and Technology,2004,115(3/4):327–340.

[19] 冯仰廉,陆治年.奶牛营养需要和饲料成分[M].3 版.北京:中国农业出版社,2007.

[20] SAMPAIO C B,DETMANN E,FILHO S D C V,et al.Evaluation of models for prediction of the energy value of diets for growing cattle from the chemical composition of feeds[J].Revista Brasileira de Zootecnia,2012,41(9):2110–2123.

[21] 姜芳.反刍动物常用饲料原料的营养价值评定及其变异度分析[D].硕士学位论文.杭州:浙江大学,2009.

[22] 邓卫东,席冬梅,毛华明.云南省反刍家畜主要饲料营养价值评价[J].黄牛杂志,2002,28(1):23–27.

[23] 刘洁.肉用绵羊饲料代谢能与代谢蛋白质预测模型的研究[D].博士学位论文.北京:中国农业科学院,2012.

[24] JUST A,JØRGENSEN H,FERNÁNDEZ J A.Prediction of metabolizable energy for pigs on the basis of crude nutrients in the feeds[J].Livestock Production Science,1984,11(1):105–128.

[25] ZARGHI H,GOLIAN A,KERMANSHAHI H.Relationship of chemical composition and metabolisable energy of triticale for poultry[C].Penicuik:British Society of Animal Science World

Poultry Science,2014.
[26] LOSADA B,BLAS C D,GARCÍA-REBOLLAR P,et al.Prediction of apparent metabolisable energy content of cereal grains and by-products for poultry from its chemical composition[J]. Spanish Journal of Agricultural Research,2015,13(2),doi:10.5424/sjar/2015132-6573.
[27] LOSADA B,GARCÍA-REBOLLAR P,ÁLVAREZ C,et al.The prediction of apparent metabolisable energy content of oil seeds and oil seed by-products for poultry from its chemical components,*in vitro* analysis or near-infrared reflectance spectroscopy[J].Animal Feed Science and Technology,2010,160(1/2):62–72.
[28] DEAVILLE E R,HUMPHRIES D J,GIVENS D I.Whole crop cereals 2.Prediction of apparent digestibility and energy value from *in vitro* digestion techniques and near infrared reflectance spectroscopy and of chemical composition by near infrared reflectance spectroscopy[J].Animal Feed Science and Technology,2009,149(1/2):114–124.
[29] KING R H,TAVERNER M R.Prediction of the digestible energy in pig diets from analyses of fibre contents[J].Animal Science,1975,21(3):275–284.
[30] 李明元,王康宁.用纤维等饲料成分预测植物性蛋白饲料的猪消化能值[J].西南农业学报,2000,13(增刊):41–50.
[31] 孙献忠.羊常用饲草的能量价值评定及其组合效应研究[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2007.
[32] ALDERMAN G.Energy and protein requirements of ruminants[M].Wallingford:CAB International,1993.
[33] YAN T,AGNEW R E.Prediction of metabolisable energy concentrations from nutrient digestibility and chemical composition in grass silages offered to sheep at maintenance[J].Animal Feed Science and Technology,2004,117(3/4):197–213.

A Study on the Prediction Model of Dietary Nutrient Digestibility and Metabolizable Energy of Mutton Sheep[1]

ZHAO Mingming[1] MA Tao[1] MA Junnan[1] JIA Peng[1] ZHAO Jiangbo[1] DENG Kaidong[2] YANG Kailun[3] DIAO Qiyu[1]*

（1. *Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Feed Biotechnology of the Ministry of Agriculture, Beijing* 100081, *China*; 2. *College of Animal Science, Jinling Institute of Technology, Nanjing* 210038, *China;* 3. *College of Animal Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *China*）

Abstract: This study aimed to establish the prediction model of dietary nutrient digestibility and metabolizable energy (ME) of mutton sheep. Sixty-six Dorper×thin-tailed *Han* crossbred F_1 mutton sheep with the body weight of (45.0±2.0) kg were selected and divided into 11 treatments and each treatment had 6 replicates with 1 sheep per replicate. According to a randomized block design, the nutrient contents of eleven diets with different roughages were determined, and the nutrient digestibility, digestible energy (DE) and ME of those eleven diets were determined using material metabolism trial and gas metabolism trial. The optimal prediction factor and the prediction equation were screened on the basis of the dietary nutrient contents, digestible nutrients, DE and ME. The results showed that dietary dry matter (DM), organic matter (OM), crude protein (CP) and gross energy (GE) digestibility were significantly positively correlated with dietary CP, GE, and OM contents (P<0.05 or P<0.01), but were significantly negatively correlated with neutral detergent fibre (NDF) content (P<0.05). Dietary NDF digestibility was significantly negatively correlated with dietary DM, OM, GP, and GE contents (P<0.05 or P<0.01), but was significantly positively correlated with NDF content (P<0.01). The optimal prediction equation for ME with dietary nutrient contents was: ME=-49.593+0.594OM-0.107NDF (R^2=0.949, P<0.01). In conclusion, dietary nutrient digestibility and ME all have a stronger correlation with dietary nutrient contents. By using dietary nutrient contents, the dietary nutrient digestibility and ME can be reasonably predicted.

Key words: mutton sheep; digestibility; nutrient; metabolizable energy; prediction model

---

*Corresponding author, professor, E-mail: diaoqiyu@caas.cn （责任编辑　菅景颖）